



«УТВЕРЖДАЮ»  
Зам. директора ФИАН

  
С.Ю. Савинов

« 2 » марта 2016 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук  
на диссертацию

**Верхеева Александра Юрьевича**

**«Изучение процессов с рождением прямых фотонов и ассоциированных адронных струй в эксперименте DØ на Тэватроне»**, представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности  
01.04.23 – физика высоких энергий.

Диссертация Верхеева А.Ю. посвящена одной из актуальных проблем физики высоких энергий – экспериментальной проверке предсказаний Стандартной модели. Одна из возможностей для этого - изучение процессов с рождением прямых фотонов и адронных струй. Их применение может позволить получить новую информацию о жёстких взаимодействиях в квантовой хромодинамике, о структурных функциях протона в широком  $x$ - $Q^2$  диапазоне бёркеновских переменных. Также, в работе уделяется большое внимание изучению процессов, происходящих в результате множественных взаимодействий, включающих в себя фотоны и адронные струи.

**Целью работы** является изучение выше указанных процессов на коллайдере Тэватрон в эксперименте DØ и их сравнение с теоретическими предсказаниями.

**Содержание работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и двух приложений. Объём диссертации составляет 143 страницы машинописного текста, включая 66 рисунков и 35 таблиц. Библиографический список состоит из 140 наименований.

Во **введении** показана актуальность темы, приведена цель работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, а также обсуждается практическая ценность полученных результатов.

В **первой главе** соискателем даётся краткий обзор теоретических подходов, заложивших основу для проведённых соответствующих экспериментальных работ. Описаны основные процессы, в результате которых рождаются прямой фотон и ассоциированная с ним адронная струя. Отдельно уделяется внимание изучению природы мультипартонных взаимодействий.

Во **второй главе** представлено детальное описание базовых характеристик ускорительного комплекса Тэватрон, а также особое внимание уделено представлению экспериментальной установки DØ и ее основных элементов, поскольку информация с этих подсистем в дальнейшем используется при регистрации и идентификации таких физических объектов, как фотоны и адронные струи.

В **третьей главе** диссертантом обсуждаются методы обработки и хранения получаемых данных. Далее представлены основные алгоритмы, которые использовались для восстановления физических объектов, используемых в диссертационной работе.

В **четвёртой главе** приводится подробное описание измерения тройного дифференциального сечения процессов, в которых рождаются фотон и ассоциированная с ним адронная струя в различных кинематических регионах. Полученные результаты сравниваются с разными теоретическими предсказаниями.

В **пятой главе** рассматриваются угловые корреляции в событиях, содержащих фотон и как минимум две или три струи, и выполняются измерения нормированных дифференциальных сечений. Такие дифференциальные сечения измеряются в различных интервалах поперечного импульса второй струи. Выполнено сравнение имеющихся теоретических моделей с данными проведенного эксперимента.

Вклад доли двойных партонных взаимодействий и эффективное сечение событий, содержащих фотон и не менее трёх адронных струй представлено в **шестой главе**. Весьма важным и, пока уникальным, является измерение, в котором одна из струй происходит из тяжёлого кварка (b/c). Тем самым впервые показано, что зависимость эффективного сечения от кваркового флэйвора отсутствует.

В **заключении** представлены **основные результаты диссертации**, выносимые на защиту:

Автором диссертации получены данные, собранные в эксперименте DØ на коллайдере Тэватрон при интегральной светимости  $8.7 \text{ фб}^{-1}$ . С их помощью были измерены и сравнены с теоретическими предсказаниями тройные дифференциальные сечения процесса с рождением прямого фотона и адронной струи,  $pp \rightarrow \gamma + \text{jet} + X$ , в 16 разных кинематических областях. Данное измерение выполнено на значительно более

высокой статистике данных и по сравнению с предыдущими измерениями обладает большей точностью. Также, впервые проведено измерение процессов с рождением прямых фотонов в области быстрот  $1.5 < |y^*| < 2.5$ .

Впервые полученные автором наборы  $pp^- \rightarrow \gamma + 3 \text{ jet} + X$  и  $pp^- \rightarrow \gamma + 2 \text{ jet} + X$  событий, соответствующие интегральной светимости порядка  $1.0 \text{ фб}^{-1}$ , используются для измерения нормированных дифференциальных сечений как функций азимутальных углов между физическими объектами в четырех различных интервалах по поперечному импульсу второй струи. Диссертантом проведено сравнение полученных результатов с различными мультипартонными моделями. Также, им впервые были измерены доли тройных партонных взаимодействий в  $pp^- \rightarrow \gamma + 3 \text{ jet} + X$  событиях.

Существенный вклад автор диссертации внёс в измерение значения такого параметра, как эффективное сечение, характеризующего поперечное распределение партонов в протоне с использованием  $pp^- \rightarrow \gamma + 3 \text{ jet} + X$  и  $pp^- \rightarrow \gamma + b/c\text{-jet} + 2 \text{ jet} + X$  событий. Это первое измерение эффективного сечения и доли двойных партонных взаимодействий в процессах, в которых рождается тяжёлая струя в конечном состоянии. Важно отметить, что впервые показана независимость параметра от сорта кварков.

**Научная новизна.** Все вышеперечисленные в заключении основные результаты диссертационной работы являются новыми и получены впервые.

**Научно-практическая значимость.** Представленные в диссертационной работе результаты представляют определенный интерес для специалистов в области экспериментальной и феноменологической физики высоких энергий и могут найти применение для более детального изучения структуры протонов. Также, выполненные измерения могут быть использованы для совершенствования мультипартонных Монте-Карло моделей и увеличения точности теоретических предсказаний.

**Личный вклад автора.** Работа выполнена автором в составе международной коллаборации DØ, Фермилаб. Все результаты, вошедшие в диссертацию, были получены непосредственно автором или при его определяющем участии.

Вполне естественно, что в диссертации имеются определенные **недостатки**.

1. Чистоту анализа можно было бы повысить, требуя противонаправленности струи и прямого гамма-кванта

2. Вопрос энергетического разрешения струй, который особенно важен при малых поперечных импульсах, заслуживает более подробного обсуждения.

Сделанные замечания не влияют на положительную оценку диссертационной работы в целом.

**Общая оценка работы.** Диссертационная работа А.Ю. Верхеева представляет собой полноценное и оригинальное исследование, посвященное решению актуальной задачи физики высоких энергий. Заявленные и поставленные цели им достигнуты. Все представленные результаты (три публикации) признаны и своевременно опубликованы в международном рецензируемом научном журнале Phys. Rev. D, удовлетворяющем требованиям, предъявленным Высшей аттестационной комиссией. Представленные результаты были им лично доложены на международных и российских семинарах, научных школах и конференциях.

Текст автореферата хорошо отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А.Ю. Верхеева доложена и обсуждена на научном семинаре Лаборатории высоких энергий Отделения теоретической физики ФИАН 15 февраля 2016 г.

Диссертационная работа **«Изучение процессов с рождением прямых фотонов и ассоциированных адронных струй в эксперименте DØ на Тэватроне»** соответствует требованиям Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 832 «О порядке присуждения учёных степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор Александр Юрьевич Верхеев заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.23 – физика высоких энергий.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник ФИАН  
доктор физико-математических наук  
e-mail: [leonidov@lpi.ru](mailto:leonidov@lpi.ru)



Леонидов Андрей Владимирович  
2 марта 2016 года

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук  
119991, ГСП-1 Москва, Ленинский проспект д. 53  
Тел. 8(400)1354264, факс 8(499)1357880, e-mail [postmaster@lebedev.ru](mailto:postmaster@lebedev.ru)

Подпись А.В. Леонидова удостоверяю

Ученый секретарь ФИАН

кандидат физико-математических наук



М.М. Цвентух